



CLEAT PADA LAPISAN BATUBARA DAN APLIKASINYA DI DALAM INDUSTRI PERTAMBANGAN

Bambang Kuncoro P.
Program Studi Teknik Geologi UPN "Veteran" Yogyakarta

Sari

Penelitian ini dilakukan pada *cleat* di dalam lapisan batubara yang dikendalikan oleh sesar dan lipatan asimetri. Lokasinya di Satui (antiklin, Formasi Tanjung), Kalimantan Selatan serta Palaran (antiklin, Formasi Balikpapan) dan Busui (sinklin, Formasi Warukin), keduanya di Kalimantan Timur. Pengamatan batubara dilakukan di zona sesar, sayap curam dan landai lipatan asimetri pada lapisan batubara yang sama di masing-masing lokasi. Pengamatan megaskopis di lapangan dan mikroskopis menggunakan *Scanning Electrone Microscope* (SEM) untuk mengetahui karakteristik geometri *cleat*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh sesar dan lipatan terhadap *cleat* ditunjukkan oleh perbedaan jumlah frekuensi *cleat* di zona sesar paling besar, kemudian semakin kecil di sayap curam dan di sayap landai. Akibat perbedaan jumlah frekuensi *cleat* tersebut, maka derajat fragmentasi batubara menjadi berbeda-beda. Batubara di zona sesar terfragmentasi, di sayap curam agak terfragmentasi, sedangkan di sayap landai kurang terfragmentasi.

Cleat dipelajari karena berhubungan dengan kehadiran mineral pirit di dalam lapisan batubara, kualitas batubara, eksplorasi dan eksploitasi CBM (*Coal Bed Methan*), aktivitas penambangan (penentuan arah penambangan, pemilihan tata letak tambang, penerapan teknologi penambangan, dan kestabilan lereng), penumpukan, hingga pemasaran batubara.

Kata-kata kunci: zona sesar, sayap curam, sayap landai, frekuensi *cleat*.

Abstract - This research at *cleat* in coal seam which controlled by fault and asymetri fold in Satui (anticline, Tanjung Formation) South Kalimantan, Palaran (anticline, Balikpapan Formation), and Busui (sincline, Warukin Formation) East Kalimantan. The coal observation has taken in fault zone, steep and slope flank in each location at the same coal seam. Megascopic observation has done to know characteristic of *cleat* geometry and supported by *Scanning Electrone Microscope*.

Results of the present study indicate that influence of fault and fold structures to the *cleats* that shown by difference of *cleat* frequency on fault zone is biggest, then successively smaller in steep flank and slope flank. As a result degree of fragmentation of coal becomes different. Coal in fault zone is fragmented, in steep flank rather fragmented, while in slope flank unproperly is fragment

Cleats are natural fractures in coal beds, which is studied in relation to pyrite mineral in coal bed, coal quality, exploration and exploitation of CBM, and mining activity (mine design, mine technology, and slope stability), stock piling, and coal marketing.

Key words: fault zone, steep flank, slope flank, *cleat* frequency.

PENDAHULUAN

Menurut Laubach (1998), *cleat* adalah rekahan alami di dalam lapisan batubara yang bersifat terbuka, terdiri atas *face cleat* dan *butt cleat*. Kedua jenis *cleat* ini pada umumnya

membentuk sudut siku atau agak siku satu sama lain dan tegak lurus terhadap permukaan lapisan batubara atau mempunyai orientasi berbeda dengan kedudukan lapisan batubara. *Face cleat* adalah sistem *cleat primer*, biasanya dominan dengan bidang individu yang lurus dan kokoh



sepanjang beberapa meter. *Butt cleat* adalah sistem *cleat* sekunder, retakannya lebih pendek, kadang melengkung dan cenderung berakhir pada bidang *face cleat* (Gambar 1). Istilah *cleat* dikemukakan oleh Dron (1925, dalam Laubach et al., 1998) dan sejumlah pengamat menganggap bahwa retak-retak pada lapisan batubara yang menyerupai kekar pada batuan disebut sebagai *cleat*. Menurut Ward (1984), *face cleat* hadir dominan, memiliki bidang individu yang lurus dan kokoh sebagai hasil perpanjangan rekahan dalam bidang yang sejajar dengan paleostress kompresif maksimum. Pembentukan *butt cleat* berkaitan dengan sejarah pembentukan batubara dan proses pengendapan lapisan batubara. Tidak ada penjelasan mengapa *cleat* hanya terbatas pada lapisan batubara.

Menurut Laubach et al. (1998), ciri dan kejadian *cleat* di dalam batubara telah terlupakan selama kurun 1966-1996 oleh literatur-literatur yang berhubungan dengan geologi. Sebagai contoh, hanya dua dokumen dalam jurnal AAPG yang secara rinci membahas rekahan di dalam batubara yang diterbitkan pada kurun waktu tersebut. Demikian juga, pada jurnal terkemuka tentang geologi batubara, yaitu *International Journal Coal Geology*, hanya menerbitkan satu artikel yang memfokuskan *cleat* di dalam 10 tahun terakhir. Jurnal-jurnal lain dan buku teks geologi juga hanya memberi perhatian kecil terhadap *cleat*. Pengabaian ini sebagian mencerminkan suatu jalan buntu yang bersejarah di dalam pemahaman ilmiah mengenai rekahan di dalam batubara.

Cleat telah menjadi isu menarik di dalam penambangan batubara, tetapi data kuantitatif tentang *cleat* sangat terbatas. Sebenarnya ada beberapa data yang tersedia pada *cleat*, yaitu orientasi, jarak antar *cleat*, bukaan, tinggi, panjang, keterhubungan antar bidang *cleat*, serta hubungan *cleat* dan diagenesis. Keseluruhan ciri-ciri tersebut sangat penting di dalam permeabilitas dan porositas batubara. Rekahan (*cleat*) pada lapisan batubara, merupakan pengendali kestabilan lereng penambangan, tempat mengalirnya gas dan cairan. Sehingga tidaklah mengejutkan jika *cleat* telah dikenal sejak lama pada tambang batubara dan pemerian tentang *cleat* telah diterbitkan berikut dugaan-dugaan kejadian rekahan sejak abad 19 (Mammatt, 1834; dikutip dari Kendall dan Briggs, 1933, dalam Laubach et al., 1998). Meski berbagai terminologi tambang untuk

rekahan-rekahan di dalam batubara telah dikenal, tetapi pembahasan rekahan yang sistematis masih terbatas. Di samping itu, pembahasan tentang *cleat* dan CBM (*coal bed methane*) telah mendapatkan perhatian, karena dikaitkan dengan permeabilitas dan porositas batubara serta sebagai tempat akumulasi dan lalunya gas. Demikian pula hubungan antara *cleat* dan sulfur, mengingat kandungan sulfur pada lapisan batubara berhubungan erat dengan aspek industri, lingkungan, perdagangan, dan teknis.

GENESA CLEAT

Menurut sejumlah peneliti (Ward, 1984; Laubach et al., 1998; Frodsham, 1999; Charles, 2002; Cristina et al., 2003; Paul, 2003), *cleat* dapat terbentuk pada periode yang berbeda di dalam sejarah pembentukan batubara akibat berbagai mekanisme seperti pengaruh proses dehidrasi atau *desiccation*, devolatilisasi, mekanisme pengendapan, tebal lapisan batubara, kandungan maseral, litotip batubara, derajat batubara, lingkungan pengendapan batubara, kontraksi termal, tektonik regional, struktur geologi, dan aktivitas pekerjaan tambang.

Ammosov (1963 dalam Ryan, 2003) menggunakan klasifikasi genetik, membagi *cleat* menjadi endogenetik dan eksogenetik. Selanjutnya Jeremic (1986), membedakan *cleat* berdasarkan genesanya menjadi tiga jenis, yaitu:

1. *Endogenic cleat* terbentuk awal *coalification* di bawah kondisi tarikan oleh gaya internal akibat pengeringan atau pengurangan air (*dewatering*) dan penyusutan matriks batubara (material organik). Berhubungan dengan tingkat kematangan batubara, orientasinya mencerminkan *paleo-cleat* dan hampir selalu tegak lurus perlapisan (Ryan, 2003). Umumnya tegak lurus bidang perlapisan, sehingga bidang *cleat* cenderung membagi lapisan batubara menjadi fragmen-fragmen tipis yang tabular.
2. *Exogenic cleat* terbentuk setelah *coalification*, dihubungkan oleh gaya eksternal yang berhubungan dengan tegasan regional. *Cleat* ini terorientasi pada arah tegasan utama dan dapat terdiri atas dua pasang kekar yang saling membentuk sudut.
3. *Induced cleat* bersifat lokal akibat penambangan, yaitu adanya perpindahan beban ke dalam struktur tambang atau



karena pengaruh peledakan. Oleh karena itu, pemahaman tentang karakteristik dan genesa *cleat* menjadi penting.

METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif-observasi, yaitu berdasarkan pada hasil pengamatan di lapangan, kemudian diuji dan diamati di laboratorium, serta didukung oleh hasil analisis. Jadi berusaha melakukan pengamatan karakteristik *cleat* secara rinci pada posisinya di struktur lipatan dan sesar. Penelitian ini bertumpu pada pengamatan *cleat* di lapangan maupun di laboratorium, sehingga mempunyai keluasaan pemahaman mengenai karakteristik *cleat* pada lapisan batubara.

Obyek penelitian terdiri atas lapisan batubara dan karakteristik *cleat*. Obyek pengamatannya adalah *cleat* pada lapisan batubara dalam satu kesatuan kendali struktur lipatan dan sesar dengan pendekatan megaskopis dan mikroskopis. Secara kasat mata, parameter *cleat* yang diamati terdiri atas jenis, kenampakan fisik, panjang, tinggi, jarak bukaan, material pengisi, jarak antar bidang dan frekuensi *cleat*. Pengamatan *micro-cleat* menggunakan alat SEM merk JEOL JSM-6360LA buatan Jepang tahun 2003 yang kondisinya masih sangat baik milik Pusat Survey Geologi. Tujuannya adalah untuk mengetahui karakter *micro-cleat* dan komposisinya. Metode dan prosedur pengujian adalah contoh dipreparasi terlebih dahulu, sebelum diuji dan diamati. Contoh dipotong hingga ukuran 20 mm³ dan dibersihkan dari debu dengan semprotan udara secara hati-hati. Contoh ditempelkan dengan lem konduksi mengandung bubuk metal di atas tempat dari kuningan atau tembaga, selanjutnya dilapisi secara elektrolisis dengan emas di dalam *vacuum evaporative coater*.

GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Lokasi obyek pengamatan terdiri atas lapisan batubara di Antiklin dan Sesar Palaran dan di Sinklin dan Sesar Busui dan di Lipatan dan Sesar Satui (Gambar 2). Pemilihan lokasi berbasis struktur geologi, bertujuan agar dapat diketahui keseluruhan perkembangan karakteristik *cleat* dalam kaitannya dengan derajat fragmentasi dalam satu kesatuan kendali struktur geologi. Lokasi di daerah struktur

lipatan: di sayap-sayap struktur antiklin dan sinklin (sayap landai dan curam untuk lipatan asimetri). Kenyataan di lapangan cukup sulit mendapatkan lokasi di puncak antiklin karena umumnya sudah tererosi, sedangkan lokasi di puncak sinklin umumnya masih tertimbun lapisan penutup, kecuali bila sudah ditambang. Lokasi di struktur sesar: di zona sesar dan bukan zona sesar. Batasan zona sesar memang sangat relatif, karena tergantung besaran dari sesar tersebut. Oleh karena itu, digunakan pendekatan lapangan berdasarkan perubahan karakteristik geometri *cleat* atau pengaruh perkekarakan akibat sesar sudah tidak dijumpai lagi.

KARAKTERISTIK *CLEAT*

Data geometri *cleat* pada lapisan batubara dapat diperoleh langsung di lapangan berdasarkan pengamatan terhadap jenis *cleat*, jarak antar *cleat* (frekuensi), lebar bukaan, pengisi, panjang, orientasi bidang *cleat*, dan derajat fragmentasi *cleat* pada posisinya di sayap landai dan curam lipatan serta di zona sesar dan bukan zona sesar. Berikut ini data karakteristik *cleat* hasil pengamatan secara megaskopis dan mikroskopis di zona sesar, sayap curam dan sayap landai Antiklin Palaran dan Sinklin Busui (Kuncoro dkk., 2007) serta Antiklin Satui (Tabel 1). Selanjutnya perolehan data karakteristik *cleat* dari daerah Palaran, Busui, dan Satui, kemudian dikelompokkan kedalam zona sesar, sayap curam, dan sayap landai lipatan (Tabel 2).

Tinggi *cleat* pada lapisan batubara secara megaskopis hanya 1-2 meter, sedangkan secara mikroskopis hanya beberapa mikron. Tinggi *cleat* dibatasi oleh *roof*, *floor*, hadirnya *parting/clay band*, dan perubahan frekuensi *cleat*. Pengukuran panjang *cleat* tidak mudah dilakukan, karena *cleat* harus diukur kearah *down dip* singkapan yang umumnya masih tertutup lapisan penutup. Pengukuran panjang *cleat* dapat dilakukan bila lapisan penutup baru saja di kupas (*stripping*), sehingga bagian atas lapisan batubara menjadi tampak jelas.

Sesungguhnya untuk mengukur lebar bukaan relatif *cleat* dan mendapatkan data yang representatif di permukaan tidaklah mudah. Mengingat data bukaan *cleat* di permukaan sulit dipercaya, terutama di lokasi tambang. Data bukaan *cleat* di lokasi tambang belum tentu mencerminkan pengaruh struktur. Umumnya



bukaan *cleat* telah dipengaruhi oleh peledakan, benturan alat berat saat penggalian, dibukanya lapisan penutup oleh kegiatan pengupasan lapisan penutup, atau akibat proses pelapukan pada lapisan batubara yang telah tersingkap. Akibat semua itu, cenderung membuat bidang *cleat* menjadi semakin terbuka. Lebar bukaan *cleat* yang dapat diamati secara kasat mata perlu menggunakan kaca pembesar, karena hampir tidak terlihat mata. Menurut Laubach et al. (1998), umumnya lebar bukaan *cleat* kurang dari 0,1 mm, meskipun kadang hadir mineral-mineral diagenetik yang mengisi rekahan *cleat* dan dapat mencapai 0,5 cm. Menurut Gamson (1993 dalam Laubach et al., 1998), lebar bukaan *cleat in situ* berkisar 0,001-20 mm. Menurut Massaroto (2000 dalam Fraillon, 2000), lebar bukaan *cleat* adalah 0,1-2 mm. Di daerah penelitian, pada singkapan *in situ* yang segar, bukaan *cleat* kurang dari 1 mm kecuali bila terisi mineral pirit atau mineral sekunder lain (Gambar 3), pada batubara lapuk, bekas peledakan, maka bukaannya dapat mencapai lebih dari 1 mm.

Jarak antar bidang *cleat* dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti derajat batubara, komposisi batubara, tebal lapisan batubara, mineral pengisi, derajat deformasi tektonik dan kompaksi, serta umur batubara. Sejumlah peneliti telah mengamati variasi jarak *cleat* yang berkaitan dengan derajat batubara, yaitu mulai dari lignit sampai batubara bituminus bervolatil menengah dan batubara antrasit, hasilnya masing-masing batubara akan membentuk suatu sebaran jarak *cleat* tertentu (Laubach et al., 1998). Peneliti yang lain menyatakan bahwa jarak antar bidang *cleat* bervariasi dari 1 mm sampai 30 cm (Ward, 1984; Paul, 2003), sedangkan menurut Massaroto (2000 dalam Fraillon, 2000), jarak antar *face cleat* 10-25 mm dan *butt cleat* 10-22 mm. Di daerah penelitian, jarak antar *cleat* di sayap landai 1-12 cm (umumnya 2-5 cm) memberikan kenampakan yang kurang terfragmenkan. Di sayap curam jarak antar *cleat* 1-10 cm (umumnya 1-3 cm) yang memberikan kenampakan agak terfragmenkan, sedangkan di zona sesar 1-8 cm (umumnya 1-2 cm) yang memberikan kenampakan terfragmenkan.

TEGASAN KOMPRESIF REGIONAL DAN CLEAT SISTEMATIS

Menurut sejumlah peneliti, orientasi optimal *cleat* batubara adalah sejajar terhadap tegasan

maksimum horisontal atau dipengaruhi tegasan kompresif regional. Menurut Ward, 1984; Laubach et al., 1998; Frodsham, 1999; Nelson, 2002; Cristina et al., 2003; dan Paul, 2003, *cleat* dapat terbentuk pada periode yang berbeda di dalam sejarah pembentukan batubara akibat berbagai mekanisme seperti pengaruh proses dehidrasi atau *desiccation*, devolatilisasi, mekanisme pengendapan, tebal lapisan batubara, kandungan maseral, litotip batubara, derajat batubara, lingkungan pengendapan, kontraksi termal, tektonik regional, struktur geologi, dan aktivitas pekerjaan tambang. Dengan kata lain, salah satu fungsi *cleat* adalah tektonik dan struktur geologi.

Kekar dapat terjadi oleh gejala tektonik maupun non tektonik. Menurut Suppe (1985), *systematic joints* adalah kekar sejajar dengan jarak teratur, terdiri atas *joint set* yaitu *joints* yang memiliki orientasi sama dan *joint system* yaitu dua atau lebih *joint set* di daerah yang sama. Selanjutnya mengacu definisi *cleat* menurut Laubach (1998), maka bila dikaitkan dengan pengertian kekar sistematis adalah sebagai berikut:

1. Kekar akibat tektonik dibedakan menjadi kekar gerus (*shear joint*) dan kekar tarik (*extension joint*). Kekar tarik atau *extension joint* terdiri atas *tension joint* (kekar tarik yang bidang rekahnya searah dengan tegasan dan bersifat terbuka) dan *release joint* (kekar tarik akibat pengurangan tekanan, orientasinya tegak lurus terhadap gaya utama). *Cleat* sebagai rekahan alami yang bersifat terbuka pada lapisan batubara dapat dibandingkan dengan *tension joint*.
2. *Cleat* yang terdiri atas *face cleat* dan *butt cleat* serta bersifat terbuka berperan penting di dalam transport fluida (Nelson, 2002; Rodrigues, 2003), sebagai media transport larutan polisulfida maupun gas pada batubara (Demchuk, 1992).
3. Mengacu kejadian kekar, maka *face cleat* pada batubara yang orientasinya sejajar arah tegasan, dapat dibandingkan dengan kejadian kekar tarik akibat *tension* dan bersifat terbuka. *Face cleat* permukaannya relatif halus, berupa bidang rata (*planar*), menerus dan memanjang, hadir pada jarak yang teratur, sedangkan *butt cleat* permukaannya kasar dan berakhir pada *face cleat*.
4. *Cleat* memperlihatkan rangkaian rekahan yang sejajar dan secara individu, kedua *cleat* tersebut umumnya saling tegak lurus atau membentuk sudut siku sampai agak siku



satu sama lain. Menurut Groshong dkk. (2008), kekar sistematis planar ditandai oleh permukaan halus, paralel, secara lateral dan vertikal menerus. *Cross joint* ditandai permukaan agak kasar, agak melengkung, secara lateral dan vertikal kurang menerus, biasanya berakhir di *planar joint* (Pashin dkk., 1999 dalam Groshong dkk., 2008). Kekar sistematis planar tidak berasosiasi dengan *cross joint*, hal ini menyiratkan bahwa *cross joint* terbentuk kemudian selama pengangkatan dan erosi.

Akhirnya dapat disimpulkan bahwa *face cleat* dapat dibandingkan dengan kekar sistematis planar, sedangkan *butt cleat* dengan *cross joint*. *Face cleat* orientasinya sejajar arah tegasan regional, sedangkan *butt cleat* sejajar atau berlawanan dengan *face cleat*.

Cleat di Daerah Lipatan dan Sesar

Orientasi *cleat* lebih mudah dikenali dibanding rekahan di dalam batuan pada skala regional dan megaskopis. Peta regional *cleat* dapat sangat jelas membedakan keseragaman dan variasi jurus *cleat*. Pada daerah yang berasosiasi dengan struktur lipatan atau sesar, maka transisi antara keseragaman pola umum jurus *cleat* dapat berubah secara berangsur maupun tiba-tiba. Keseragaman atau kesejajaran jurus *cleat* di struktur lipatan maupun zona sesar merupakan respon *cleat* terhadap pola tegasan regional. Studi kekar dan orientasinya dapat mengungkap urutan dan waktu kejadian tektonik serta memberi informasi orientasi arah tegasan utama pada batuan *brittle*, proses pengangkatan dan perlipatan, atau geometri cekungan. Menurut Ryan (2003), arah tegasan pada lipatan berhubungan dengan orientasi *cleat* (Gambar 4). Orientasi optimal *face cleat* pada bagian sumbu dan sayap lipatan adalah sejajar terhadap arah tegasan maksimum horisontal atau tegasan utama regional. Pada *butt cleat* biasanya berorientasi sejajar poros sumbu atau jurus perlipatan.

Pengamatan orientasi *cleat* di Antiklin Palaran dan Antiklin Satui dilakukan pada daerah bukaan tambang, sedangkan di Sinklin Busui pada daerah yang belum ditambang. Kenampakan *cleat* di ketiga tempat tersebut tersingkap sangat baik. Orientasi *cleat* di sayap-sayap Antiklin Palaran, Sinklin Busui, dan Antiklin Satui asimetri memperlihatkan adanya pola sejajar arah tegasan utama lipatan atau

tegak lurus sumbu lipatan. Atas dasar bentuk *cleat* yang lurus, sejajar, jarak yang teratur, dan memiliki orientasi yang sejajar tegasan utama struktur lipatan, maka dapat disimpulkan bahwa *face cleat* di ketiga daerah penelitian telah berkembang sebagai sistematis *cleat* yang dikendalikan oleh tegasan utama lipatan (Gambar 5).

Karakteristik geometri *cleat* di zona sesar, sayap curam, dan sayap landai/bukan zona sesar adalah berbeda. Hal ini dapat dijelaskan karena adanya perbedaan proses-proses geologi yang berlangsung setelah pembentukan awal *cleat*, yaitu perbedaan intensitas perlipatan, pensesaran, dan perkekar. Lapisan batubara di zona sesar telah mengalami proses perlipatan kuat, pensesaran, dan perkekar, sedangkan di sayap curam terlipat kuat, dan terakhir di sayap landai terlipat lemah.

Cleat dan Kehadiran Mineral Pirit

Mineral pirit (FeS_2) merupakan salah satu mineral yang memberikan kontribusi cukup besar terhadap kandungan sulfur di dalam batubara. Berdasarkan genesanya, dapat dibedakan menjadi pirit syngenetik dan epigenetik. Pirit epigenetik terbentuk setelah atau saat terjadi pembatubaraan, biasanya dapat diamati sebagai pirit pengisi *cleat* batubara. Pirit dapat juga terbentuk sebagai hasil reduksi sulfur oleh airtanah yang mengandung ion besi. Bentuk pirit hasil reaksi reduksi ini umumnya framboidal. Pirit epigenetik umumnya hadir dalam bentuk masif, sebarannya tidak seragam, melainkan dapat tersebar sebagai butiran kecil, kristal euhedral sampai anhedral yang berkelompok atau membentuk lapisan yang mengisi permukaan *cleat* batubara, menggantikan material asli tumbuhan (*replacement*), berupa lembaran (*platy*) yang mengisi sepanjang *face cleat* (*vertical joint*), dapat pula mengandung kristal pirit yang luas yang dibangun oleh permukaan kristal bersifat masif, kumpulan dari kristal halus (*framboids pyrite*), dan sebagai nodul atau urat di dalam *cleat* (Gluskoster, 1970; Horne, 1978; Cook, 1999).

Hasil pengamatan megaskopis di zona sesar, diketahui bahwa pirit hadir mengisi bidang *cleat* dan sesar, berupa lembaran yang tersebar tidak merata (Gambar 6). Selanjutnya dari kenampakan optis SEM, dapat dikenali kehadiran mineral pirit framboidal dan euhedral



yang mengisi bidang *cleat* dan rongga, baik di sayap curam maupun zona sesar (Gambar 7). Berdasarkan penjelasan di atas, maka tampak adanya hubungan antara kandungan sulfur pada lapisan batubara dan karakteristik *cleat* yang dikendalikan oleh struktur geologi.

Kehadiran mineral pirit pada bidang *cleat* atau di dalam lapisan batubara perlu mendapat perhatian pada kegiatan tahap eksplorasi, penggalian, pengolahan, penumpukan, dan pemasaran. Hal ini penting karena berkaitan dengan permasalahan lingkungan dan pemanfaatan batubara. Oksida-oksida sulfur yang dilepas pada saat pembakaran batubara merupakan sumber utama dari hujan asam dan unsur-unsur jejak beracun yang berhubungan dengan pirit.

Cleat dan CBM

Diketahuinya hubungan antara struktur geologi dan karakteristik geometri *cleat* akan memberi manfaat kepada bidang eksplorasi dan pemanfaatan CBM. Bidang *cleat* berfungsi sebagai rongga pori, tempat akumulasi, dan lalunya gas metan dan air atau sebagai saluran pokok untuk perpindahan gas metana dari reservoir batubara. Permeabilitas CBM yang melalui lapisan batubara sangat dipengaruhi oleh frekuensi *cleat* dan derajat perkembangan fragmentasi *cleat*.

Berdasarkan penyelidikan yang lebih baik tentang orientasi *cleat* dan jenis rekahan telah berhasil mempelajari parameter-parameter yang dapat menghasilkan pengertian mendalam mengenai permeabilitas di dalam batubara (Laubach et al., 1998; Fraillon, 2000; Nelson, 2002; Charles, 2003; Amy et al., 2003; Lyons, 2003). Menurut Charles (2003), ketika derajat batubara meningkat, maka jarak antar *cleat* semakin rapat, pada akhirnya dapat meningkatkan porositas efektif *cleat* dan permeabilitas. Dengan kata lain, *cleat* mempunyai arti penting di dalam pemanfaatan CBM.

Cleat dan Industri Pertambangan Batubara

Karakteristik geometri *cleat* dapat berpengaruh terhadap:

1. Kehadiran mineral pirit: bukaan dan frekuensi *cleat* merupakan fungsi dari tempat lalu dan akumulasi larutan polisulfida yang dapat bereaksi dengan FeS

atau Fe_3S_4 membentuk pirit. *Cleat* bertindak sebagai sistem jaringan airtanah yang mengangkut kation-kation terlarut, yaitu ion-ion Fe. Pembentukan mineral pirit sangat dipengaruhi oleh adanya sulfur primer yang telah tereduksi, kation besi, dan tempat yang cocok untuk pembentukannya.

2. Kualitas batubara: karakteristik *cleat* mempengaruhi besarnya kandungan pirit dan pengotor di dalam lapisan batubara, sehingga akhirnya akan mempengaruhi kandungan kalori batubara.
3. Eksplorasi dan eksploitasi CBM (Coal Bed Methan): pemahaman tentang *cleat* akan membantu di dalam penentuan arah Bergeraknya gas, sebagai tempat lalu dan akumulasi gas, serta estimasi cadangan.
4. Aktivitas penambangan pada tambang terbuka: sebagai salah satu dasar penentuan arah penambangan, pemilihan tata letak tambang, penerapan teknologi penambangan, dan kestabilan lereng (Gambar 8). Pada operasi penggalian, arah penggalian sejajar atau tegak lurus *face cleat*, tentunya akan berbeda dalam kecepatan dan kemudahan kerja alat. Bukaan *cleat* dapat dipengaruhi oleh perpindahan beban ke dalam struktur tambang atau karena pengaruh peledakan, akibatnya orientasi *cleat* menjadi tidak teratur dan bidang *cleat* semakin terbuka.
5. Aktivitas penambangan pada tambang dalam: *cleat* menjadi penting dalam efisiensi desain dan keselamatan tambang batubara bawah tanah (Gambar 9).
6. Pengangkutan, penumpukan, dan pemasaran batubara: *cleat* berkaitan dengan ukuran batubara, material pengisi bidang *cleat*, karena bidang *cleat* sering diisi oleh unsur mineral *epigenetik* pirit, karbonat, dan lempung jenis sulfida atau sulfat. Pada akhirnya akan berpengaruh terhadap lama penumpukan dan pada spesifikasi batubara saat akan dipasarkan.

KESIMPULAN

Pola *cleat* di daerah Palaran, Busui, dan Satu telah berkembang sebagai *cleat* sistematis yang orientasinya dikendalikan oleh struktur lipatan dan sesar sebagai hasil tegasan kompresif regional. Perbedaan karakteristik geometri *cleat* dan derajat fragmentasi batubara di zona sesar, sayap curam, dan sayap landai lipatan atau bukan zona sesar, menunjukkan adanya



hubungan genetik antara karakteristik geometri *cleat* dan struktur geologi yang mengendalikannya.

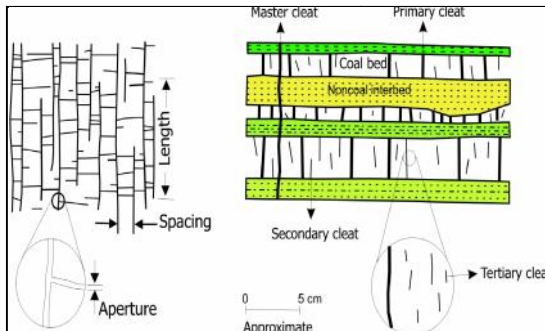
Cleat dipelajari karena berhubungan dengan kehadiran mineral pirit di dalam lapisan batubara, kualitas batubara, eksplorasi dan eksploitasi CBM, aktivitas penambangan (penentuan arah penambangan, pemilihan tata letak tambang, penerapan teknologi penambangan, dan kestabilan lereng), penumpukan, hingga pemasaran batubara.

PUSTAKA

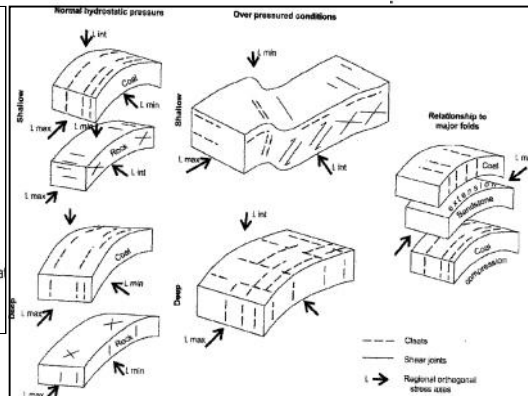
1. Amy E. Whitaker, 2003, A Methodology to Predict Fracture Permeability at Depth in Coalbed Methane Prospects, with the Ferron Coal, Utah as an Example: *AAPG Annual Meeting*.
2. Casagrande, D.J., Siefert, K., Berschinski, C., Sutton, N., 1977, Sulfur in peat-forming systems of the Okefenokee Swamp and Florida Everglades: origins of sulfur in coal: *Geochimica et Cosmochimica* 44.
3. Cook, Alan, 1999, Coal Geology and Coal Properties, Keiraville Consultants, 7 Dallas St Keiraville NSW 2500 Australia.
4. Demchuk, T.B., 1992, Epigenetic pyrite in a low sulphur, sub bituminous coal from Central Alberta Plains: *International Journal of Coal Geology* 21, Elsevier.
5. Diessel C.F.K., 1992, Coal bearing depositional systems, Springer-Verlag Berlin, 721 p.
6. Fraillon Medrica, 2000, The Numerical Modeling of Fluid Flow In Coal As A Porous Media, Department of Chemical Engineering, The University of Queensland.
7. Frodsham K., R.A. Gayer, 1999, The impact of tectonic deformation upon coal seams in the South Wales coalfield, UK, *International Journal of Coal Geology* 38, p 297–332.
8. Gluskoster H.J., and Hopkins M.E., 1970. Distributions of sulphur in Illinois coal in depositional environments in parts of Carbondale Formation, Western and Northern Illinois: *Illinois State Geological Survey Guidebook*, No. 8.
9. Groshong, Jr R.H., Pashin J.C., dan McIntyre R.M. (2008) : Structural Controls on Fractured Coal Reservoirs in the Southern Appalachian Black Warrior Foreland Basin, *Journal of Structural geology*, Elsevier, 1-13.
10. Horne J.C. et al., 1978. Depositional models in coal exploration and mining planning in Appalachian Region: *AAPG Bull.*, vol. 62, p. 2379-2411.
11. Jeremic, M.L., 1985, Strata Mechanics in Coal Mining, A.A. Balkema Rotterdam.
12. Kuncoro, P.B., Notosiswoyo S., dan Anggayana K. (2007) : Karakteristik *Cleat* pada Lapisan Batubara yang Terlipat dan Tersesarkan di Daerah Palaran dan Busui, Kalimantan Timur, *Jurnal Geoplrika*, Kelompok Keahlian Geologi Terapan, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi , ITB, 2, 53-66.
13. Laubach S.E., R.A. Marrett, J.E. Olson, A.R. Scott, 1998, Characteristics and origins of coal *cleat*: A review, *International Journal of Coal Geology* 35, p 175–207.
14. Lyons, P.C. (2003) : Coalbed Methane Potential in the Appalachian States of Pennsylvania, West Virginia, Maryland, Ohio, Virginia, Kentucky, and Tennessee - An overview, Open-File Report 96-735, <http://pubs.usgs.gov/of/1996/of96-735/cleats.htm>.
15. Nelson, Charles R., 2002, *Cleat* property trends in San Juan Basin Fruitland Formation coalbed reservoirs, *Rocky Mountain Section Meeting Technical Program*.
16. Rodrigues, C., Laiginhas C., Fernandes M., dan Lemos Sousa M.J. (2003) : The Role of Coal Cleat System in Coalbed Methane Prospecting/ Exploring, *AAPG International Conference and Exhibition Technical Program*.
17. Ryan Barry, 2003, *Cleat* Development in Some British Columbia Coals, New Ventures Branch, *Geological Fieldwork 2002, Paper 2003-1*, British Columbia Geological Survey.
18. Suits and Arthur, 2000, Sulfur diagenesis and partitioning in Holocene Peru Shelf and Upper slope sediments, *Chemical Geology, Isotope Geoscience*, Vol. 163, Elsevier.
19. Suppe, J. (1995) : Principles of Structural Geology, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, 537.
20. Ward, C.R., 1984, Coal Geology and Coal Technology, Blackwell Scientific Publications, Singapore.



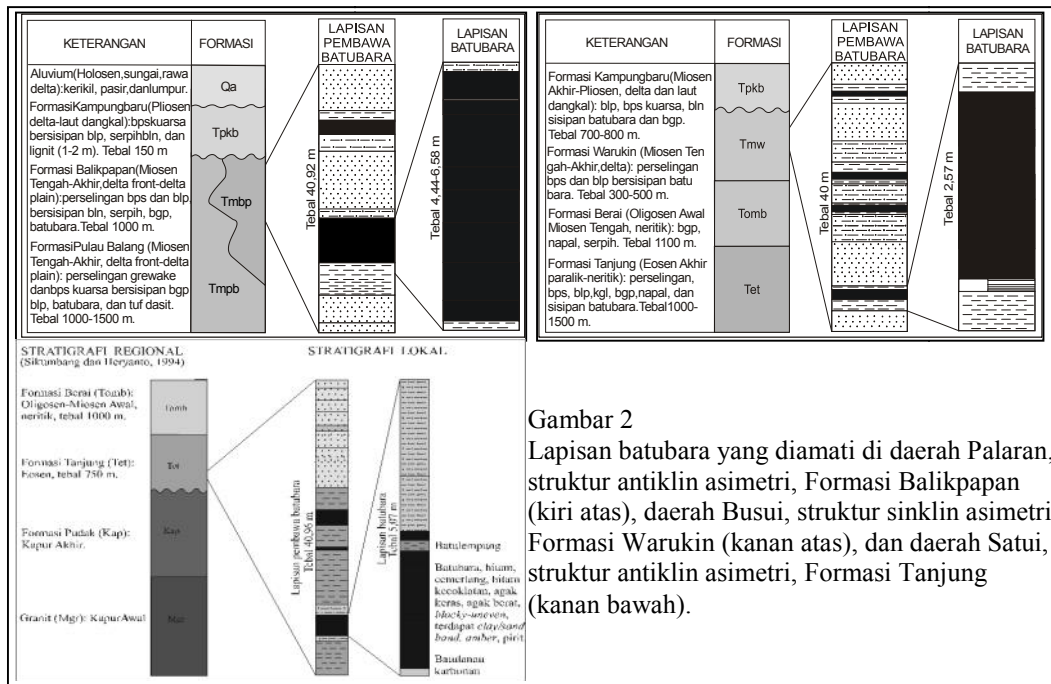
PROSIDING SIMPOSIUM DAN SEMINAR
GEOMEKANIKA KE-1 TAHUN 2012
MENGGAGAS MASA DEPAN REKAYASA BATUAN &
TEROWONGAN DI INDONESIA



Gambar 1 Kenampakan *cleat* tampak atas dan penampang melintang (Laubach, 1998).



Gambar 4 Orientasi *cleat* berdasarkan arah tegasan dan perlipatan (Ryan, 2003).



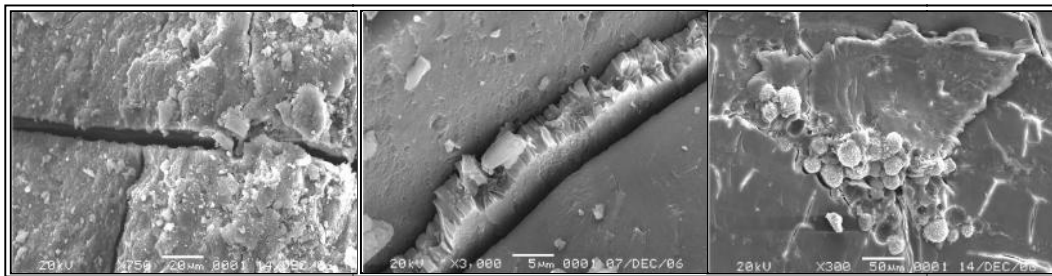
Gambar 2 Lapisan batubara yang diamati di daerah Palaran, struktur antiklin asimetri, Formasi Balikpapan (kiri atas), daerah Busui, struktur sinklin asimetri, Formasi Warukin (kanan atas), dan daerah Satui, struktur antiklin asimetri, Formasi Tanjung (kanan bawah).



Gambar 3 Bukaan *cleat* secara kasat mata di sayap landai umumnya tertutup (kiri), di sayap curam sebagian terbuka (tengah), dan di zona sesar umumnya terbuka (kanan). Jarak antar *cleat* di sayap landai 1-12 cm (umumnya 2-5 cm) yang kurang terfragmenkan (kiri), di sayap curam 1-10 cm (1-3 cm) yang agak terfragmenkan (tengah), dan di zona sesar 1-8 cm (1-2 cm) yang terfragmenkan (kanan).



Gambar 6 *Cleat* tertutup di sayap landai, pengisi tidak teramati (kiri), *cleat* terbuka di sayap curam terisi oksida besi dan lempung (tengah), dan di zona sesar terisi pirit (kanan).



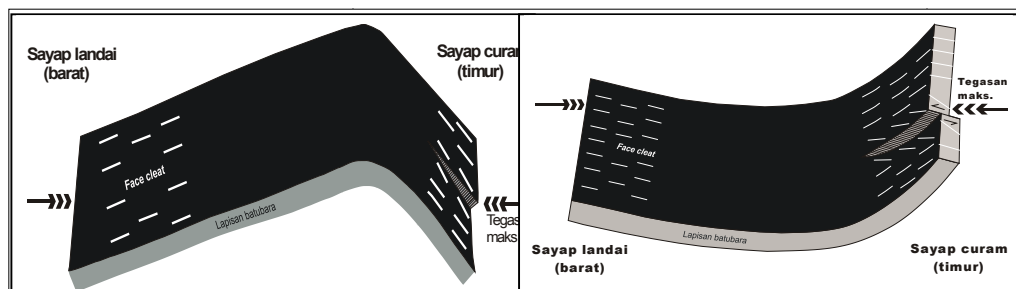
Gambar 7 Kenampakan *microcleat* hasil pengamatan SEM di sayap landai yang terbuka dan tidak tampak adanya pengisi (atas), di sayap curam terbuka dan terisi oleh mineral lempung (tengah), di zona sesar terbuka dan terisi mineral pirit (bawah).



Gambar 8 *Cleat* fragmental di zona sesar yang memacu ketidakstabilan lereng di Palaran.



Gambar 9 Frekuensi *cleat* yang rapat dan terbuka telah menimbulkan kebocoran dan ketidakstabilan atap terowongan.



Gambar 5 Orientasi *cleat* sistematis yang tegak lurus sumbu lipatan



PROSIDING SIMPOSIUM DAN SEMINAR
GEOMEKANIK KE-1 TAHUN 2012
MENGAGAS MASA DEPAN REKAYASA BATUAN &
TEROWONGAN DI INDONESIA

Tabel 1 Karakteristik *cleat* hasil pengamatan megaskopis dan mikroskopis di zona sesar, sayap curam dan sayap landai Antiklin Palaran (AP), Sinklin Busui SB), dan Antiklin Satui (AS).

Cleat	Sayap landai antiklin			Sayap curam antiklin			Zona sesar		
	AP	SB	AS	AP	SB	AS	AP	SB	AS
Karakterstik secara megaskopis									
Jenis	Face cleat								
Panjang (cm)	> 1.700		>2.000	>1.100		>1.500			
Tinggi (cm)	23-131	10-38	15-60	40-152	18-64	20-40	38-90	18-51	15-60
Bukaan (cm)	0,1-0,2 dan memperlihatkan kenampakan yang sebagian tertutup dan terbuka								
Jarak antar cleat (cm)	1-12 (2-5)	1-10 (2-3)	1-10 (1,5-2)	1-10 (1-5)	1-5 (1-3)	1-5 (1-2)	1-10 (1-2)	1-8 (1-2)	1-8 (1-2)
Frekuensi cleat	16-19	19-21	18-25	16-23	20-24	21-26	22-27	22-25	21-28
Kedudukan	N270-340°E/ 55-88°	N60-130°E/ 64-88°	N90-150°E/ 74-88°	N110-180°E/ 59-88°	N230-360°E/ 74-90°	N70-140°E/ 84-90°	N317-322°E// 81-85°	N60-70°E/ 75-87°	N120-180°E/ 70-85°
Orientasi (jurus cleat)	N290-300°E	N90-100°E	N110-120°E	N120-130°E	N280-290°E	N110-120°E	N320°	N64°E	N140°E
Pengisi	Lempung, oksida besi						Lempung, oksida besi, pirit		
Derajat fragmentasi	Kurang terfragmenkan			Agak terfragmenkan			Terfragmenkan		
Karakterstik secara mikroskopis									
Jenis - bidang cleat	Face cleat - terbuka								
Panjang (µm)	180-400	30-400	30-90	40-750	40-750	40-120	600-900	600-900	600-900
Bukaan (µ m)	1-10	1-10	1-3	5-15	2-15	2-5	5-15	5-15	3-10
Bukaan (%)	90	90	95	95	85	90	90	90	90
Pengisi cleat	Silika, mineral lempung, sulfida, dan molibdenit						Silika, sulfida, mineral pirit, lempung, molibdenit, kuarsa		



Tabel 2 Deskripsi karakteristik *cleat* pada posisinya di sayap landai, sayap curam, dan zona sesar.

Cleat	Sayap landai lipatan	Sayap curam lipatan	Zona sesar
Karakteristik secara megaskopis			
Jenis	Face cleat		
Panjang (cm)	>2.000	>1.500	
Tinggi (cm)	10-131	20-152	18-90
Bukaan (cm)	0,1-0,2 dan memperlihatkan kenampakan yang sebagian tertutup dan terbuka		
Jarak antar cleat (cm)	1-12 (2-5)	1-10 (1-3)	1-8 (1-2)
Frekuensi cleat	16-25	20-26	22-28
Pengisi	Lempung, oksida besi		Lempung, oksida besi, pirit
Derajat fragmentasi	Kurang terfragmenkan	Agak terfragmenkan	Terfragmenkan
Orientasi jurus cleat	Berarah sejajar dengan arah tegasan utama lipatan atau tegak lurus sumbu lipatan		
Karakteristik secara mikroskopis			
Jenis dan bidang cleat	Face cleat dan terbuka		
Panjang (μm)	30-400	40-750	600-900
Bukaan (μ m)	1-10	2-15	5-15
Bukaan (%)	90-95	85-95	90
Pengisi cleat	Silika, mineral lempung, sulfida, dan molibdenit		Silika dan sulfida, mineral pirit, lempung, molibdenit, kuarsa